

令和 2 年 7 月 8 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05978

研究課題名(和文) 極微小断面を有する金属マイクロエレメントの新しい引張圧縮疲労寿命評価試験

研究課題名(英文) A New Tension/Compression Fatigue Test Method under Cyclic Axial Loading for Metallic Micro-Elements

研究代表者

田中 拓 (Tanaka, Hiroshi)

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80236629

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、最小断面直径が1mm未満の細線に対して、座屈せずに軸力による引張圧縮疲労試験が可能となる試験片作製方法とその疲労試験方法を新たに提案した。工業用純鉄線を対象として検討した結果、最小断面直径が700 μ m、500 μ mおよび180 μ mの試験片を作製できた。ウッド合金チャックを利用した自作の疲労試験機に特別な工夫を施して取り付けすることで、最小断面直径180 μ mまでは本研究の方法で、細線の座屈が生じることなく、軸力による引張圧縮疲労試験が十分な精度で可能になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでに行われていた細線の引張圧縮疲労試験としては、軸力ではなく、繰返し曲げを与える方法がとられてきた。しかし、曲げでは塑性変形が生じると応力の値を正確に知ることができない致命的な欠点があった。本研究で開発した軸力を用いた試験によって、初めて正しいS-N曲線が得られるようになった。これによって、微小素材に対してS-N曲線に基づく耐疲労設計が可能になることは、工学上とても大きな意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, a new tension/compression fatigue test method under cyclic axial loading for metallic thin wires used for MEMS was developed. The electrolytic polishing was applied to commercially pure iron wire to prepare a test piece with a minimum wire diameter of 700-180 μ m, and developed tension/compression fatigue tests were successfully conducted. The developed method is much better than conventional fatigue tests using reversed bending loading, because an accurate value of stress could not be obtained under bending due to plastic deformation. The fatigue life decreased as the stress ratio, R, increased for R=-1, -0.1 and 0.1. For R=-1 and high-cycle fatigue of R=-0.1, the fatigue crack propagation caused failure, while for R=0.1 and low-cycle fatigue of R=-0.1, fatigue failure due to accumulation of plastic deformation was observed. Also, the effect of wire diameter was examined. Compared at the same stress amplitude, the fatigue life increased as the wire diameter decreased.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：構造・機能材料 マイクロマシン 金属物性 引張圧縮疲労 軸力

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

マイクロ・ナノテクノロジーは 21 世紀を代表する技術の一つとして社会に広く認知され、医療、センサなどの様々な分野で実用化が進められている。それに伴い、マイクロマシンや MEMS の部品として使用される mm 未満の微小断面寸法をもつ材料の強度・信頼性を確保することが非常に重要となっている。このような微小材料はこれまでの機械で使用されてきた mm 以上の断面寸法の部品とは同じ素材でも異なる機械的特性を示すことが少なくないため、実際のマイクロマシンや MEMS などに使われる寸法の微小材料に対する材料試験が必要である。特に、金属の微小材料で、長期間の使用に耐えることが求められる場合、繰返し応力による金属疲労特性の把握が不可欠であり、従来の大きな寸法の金属部品と同じように実験的に得られる *S-N* 曲線に基づいた耐疲労設計が求められる。しかしながら、微小断面の金属細線に対する疲労試験は圧縮による座屈が生じない引張疲労に限られてきた。このため、引張圧縮疲労試験法の確立が求められており、アメリカ材料試験協会 (ASTM) では細線の回転曲げ試験法が最近整備され、また、研究代表者らは細線の繰返し曲げ疲労試験が行える疲労試験システムを考案している。しかしながら、これらのように曲げによって表面に引張圧縮応力を加える方法では、表面付近だけ高い応力を受けて塑性変形するため、実際に表面に作用している応力の値がわからないという根本的な問題がある。

以上の背景から、微小断面の金属細線の引張圧縮疲労試験には、曲げではなく引張圧縮の軸力を与え、かつサンプルが座屈しない新しい方法が必要と考え、本研究を計画するに至った。軸力による試験であれば、軸力を断面積で割れば正しい応力の値が簡単に求められる。

2. 研究の目的

以上の背景から、本研究では、最小断面直径が 1mm 未満の細線に対して、座屈せずに軸力による引張圧縮疲労試験が可能となる試験片作製方法とその疲労試験方法を新たに提案し、マイクロマシンや MEMS の長期信頼性の向上を図ることを目的とする。図 1 のように、細線の直径に比べてゲージ長さが大きすぎることなく、圧縮による座屈が起こらないような試験片の作製と試験機へのセットアップを可能とし、細線に対する新しい引張圧縮疲労試験を実現する。最終的には最小断面の直径が 150 μm 程度以下の極微小断面サンプルへの適用を可能とすることを目標とした。

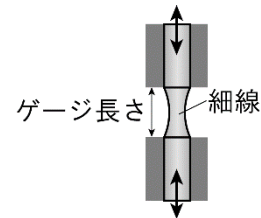


図 1 軸力による細線の引張圧縮疲労試験方法

3. 研究の方法

(1) 供試材

本研究では、初期の直径 1.45mm、純度 99.5%の工業用純鉄線を供試材とした。まず、コイル状に巻かれていた供試材に対して約 2%の引張塑性ひずみを与えて直線状にしてから、真空電気炉を用いて 1123K で 3.6ks 保持することによって残留ひずみを取り除いた。この熱処理によって得られた試験材料の平均結晶粒径は 23 μm となった。

(2) 疲労試験片の作製

前項の方法で準備した工業用純鉄線に対して、酸化膜を機械的に除去した後、過塩素酸無水酢酸を用いて電解研磨することによって疲労試験片を作製した。電解研磨では、電流 0.2A で、最も溶解速度が高い液面を周期 0.8Hz で上下することによって、細線中央部の直径が緩やかに変化するように工夫した。本研究では最小断面直径が 700 μm 、500 μm および 180 μm の試験片を作製できた。図 2 に最小断面直径が 180 μm の試験片の最小断面部の写真を示す。このように、直径変化が緩やかで応力集中がほとんどない試験片が作製できた。

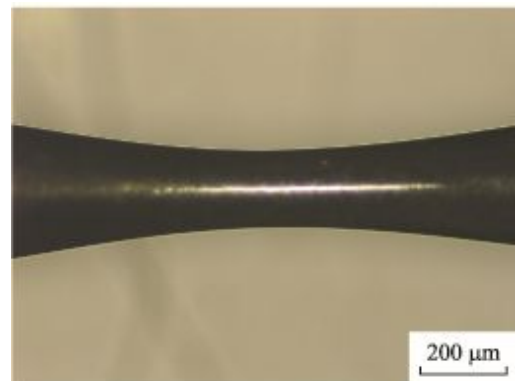


図 2 試験片最小断面部

(3) 疲労試験システム

疲労試験には、動電型加振機を用いた低荷重（容量 490N、196N あるいは 49N）の軸力用のフィードバック制御疲労試験システムを本研究用で自作して用いた。非接触型のレーザ変位計を用いてアクチュエータの変位を測定することで、試験力に影響を及ぼすことなく疲労破壊に至るまでの試験片の塑性変形過程を検討することが可能である。試験片最小断面部の様子は CCD カメラやビデオマイクロスコープを用いてその場観察できる。

作製した細線試験片が曲げなどによる損傷を受けないように疲労試験機に取り付けるためには、特別な工夫を要した。まず、後述の試験片下部チャッキングの直前までは試験片をペーパーフレームに固定し、曲がるのを防いだ。また、試験機下部側のチャックには低融点のウッド合金で満たした容器を取り付けた。まず上部のチャックに試験片を取り付ける。次に、下部チャックのウッド合金を加熱溶解させ、試験片下部をウッド合金に埋没させてから自然冷却し、固定する。

このようにウッド合金チャックを使用することによってチャッキング時に試験片に負荷がほとんど加わらなくなり、チャッキング時の試験片の変形や破損を防ぐことができる。

(4) 疲労試験条件

疲労試験は室温大気中において、正弦波状に変化する軸力で行った。応力繰返し速度は 10Hz である。応力比 R (最小応力 / 最大応力) として、 $R = -1.0$ (完全両振り引張圧縮)、 -0.1 (部分引張圧縮) および 0.1 (引張引張) を選んで実施し、結果を比較した。

4. 研究成果

(1) 軸力による引張圧縮疲労試験の成否

図 3 は、最小断面直径 $180\mu\text{m}$ の場合に、完全両振り ($R = -1$) の引張圧縮疲労試験得られた $S-N$ 曲線である。応力振幅 σ_a と疲労寿命 N_f の相関が明瞭であり、データのばらつきも少ない。このように、最小断面直径 $180\mu\text{m}$ までは本研究の方法で、細線の座屈が生じることなく、軸力による引張圧縮疲労試験が十分な精度で可能になったといえる。これはこれまで達成されていなかった大きな成果である。ただし、最小断面直径がこれ未満になると、試験片の作製こそ一見可能であったが、疲労試験では座屈の影響が現れ試験結果が大きくばらついた。原因としては試験片の作製精度と試験機への取り付けの精度との両方が考え得るが、本研究の期間内に原因を究明して改良することはできなかった。これは今後の大きな課題である。

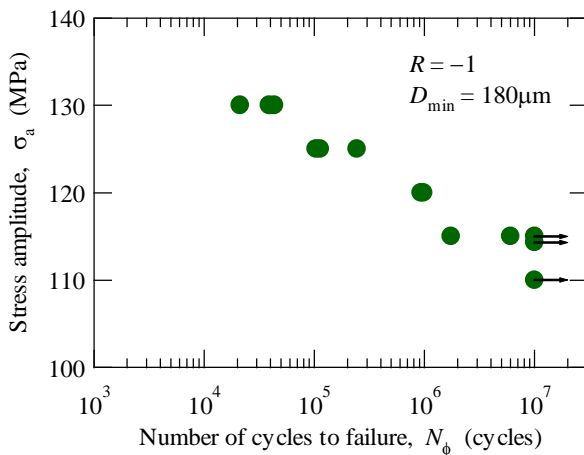


図3 S-N曲線 (最小断面径 $180\mu\text{m}$, 完全両振り)

(2) 曲げ疲労試験との比較と応力比の影響

図 4 は、最小断面直径が $700\mu\text{m}$ の試験片に対して、本研究の軸力による引張圧縮疲労試験によって、応力比 R が -0.1 および -1 (完全両振り) で得られた $S-N$ 曲線である。また、比較として、同じ最小断面直径 $700\mu\text{m}$ に対して、先行研究の両振り曲げ疲労試験で得られた結果を図 5 に示す。ここで図 5 の M_{\min} と M_{\max} はそれぞれ最小・最大曲げモーメントである。また縦軸は、曲げモーメント振幅 M_a を断面係数 Z で割った値であり、塑性変形が生じていない場合の応力振幅に相当する。しかし、この細線試験片の引張りによる降伏応力は約 143MPa であり、図 5 のすべてのデータで縦軸の値はこの降伏応力を超えている。したがって、試験片に塑性変形が生じていることは明らかであり、真の応力振幅は図 5 の値より低いはずであるが、その値はわからない。冒頭で述べたように、この点が本研究以前の曲げ疲労試験の最大かつ致命的な欠点である。一方で、軸力による疲労試験では軸力を断面積で割れば正しい応力の値が簡単に得られる。

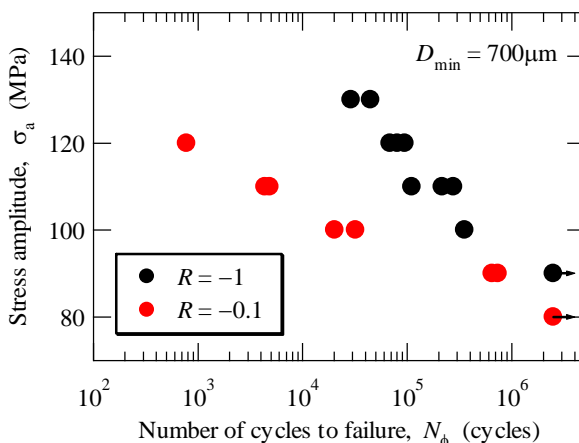


図4 軸力による引張圧縮疲労試験 (本研究)

図 4 と図 5 の縦軸のスケールの違いに注意すると、図 4 の軸力による引張圧縮疲労試験の応力振幅は、図 5 の値より著しく小さく、図 5 の曲げ疲労試験における縦軸の値は実際の応力をかなり過大評価していたことがわかる。この結果から、本研究によって初めて正しい $S-N$ 曲線が得られるようになった。これによって、曲げだけでなくあらゆる種類の負荷を受ける微小素材に対して $S-N$ 曲線に基づく耐疲労設計が可能になることは、工学上とても大きな意義があると考えられる。

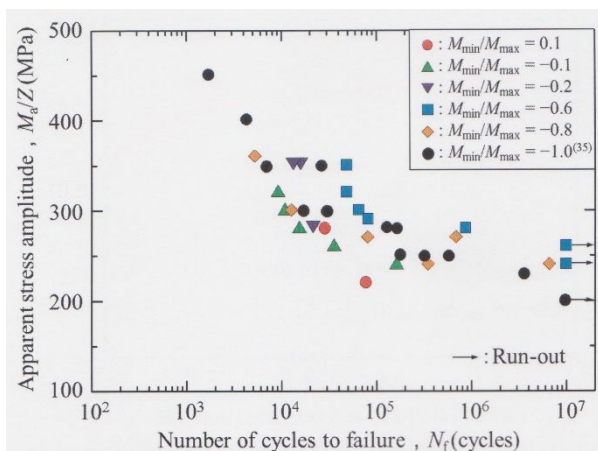


図5 曲げによる引張圧縮疲労試験 (先行研究)

このように、本研究によって、微小素材に対して $S-N$ 曲線に基づく耐疲労設計が可能になることは、工学上とても大きな意義があると考えられる。

図4に戻ると、同じ応力振幅でも完全両振りの $R = -1$ に比べて最大引張応力が大きくなる $R = -0.1$ のほうが、低寿命の領域で疲労寿命が大幅に短いことがわかる。疲労破壊過程を観察したところ、 $R = -1$ のすべての破断試験片、および $R = -0.1$ で応力振幅が 90MPa の試験片は、疲労き裂進展によって破壊したが、一方で、 $R = -0.1$ で応力振幅が 90MPa を超える低寿命の試験片（疲労寿命が 10^5 サイクル未満）では疲労き裂が見られず、引張塑性変形が蓄積していき破断に至った。さらに、同じ試験片で応力比が $R = 0.1$ の場合は、 $R = -0.1$ よりさらに最大引張応力が大きくなるため、すべての破断試験片が引張塑性変形蓄積型であった。つまり、疲労負荷を受ける中で最大引張応力がある程度以上になると、疲労き裂進展型の破壊でなく引張塑性変形蓄積型の破壊に遷移することがわかった。なお、図5の曲げ疲労試験の場合、最小曲げモーメント M_{\min} と最大曲げモーメント M_{\max} の比 M_{\min} / M_{\max} が $-1 \sim 0.1$ のすべての場合において疲労き裂進展型の破壊であり、曲げ疲労試験では応力を過大評価するだけでなく破壊メカニズムまで軸力引張圧縮とは異なってしまふことがわかった。これは、正しい応力がわからないため、実際の応力比も曲げモーメント比 M_{\min} / M_{\max} とは異なってしまっているためと思われる。

(3) 線径の影響と結晶粒径の影響

本研究では、軸力による引張圧縮疲労試験で得られる疲労寿命について、最小断面部の線径の影響、および結晶粒径の影響も検討した。

まず、図6は、完全両振り ($R = -1$) で最小断面直径が $700\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$ 、および $180\mu\text{m}$ の場合を比較したものである。同じ応力振幅であれば最小断面径が小さい場合ほど長寿命であった。

また、図7は、熱処理条件を変えることで結晶粒径が $300\mu\text{m}$ と大きい試料を作製し、粒径が $23\mu\text{m}$ の場合と比較した結果である。最小断面直径は $700\mu\text{m}$ で完全両振り ($R = -1$) である。同じ応力振幅なら粗大結晶のときのほうが疲労寿命は著しく短くなることがわかった。

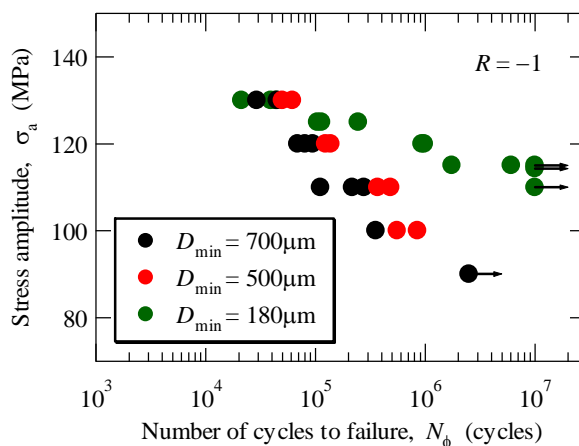


図6 疲労寿命に及ぼす最小断面径の影響

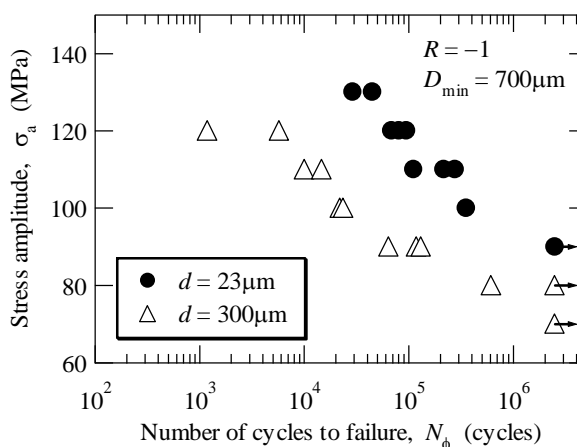


図7 疲労寿命に及ぼす結晶粒径の影響

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 永岡誠
2. 発表標題 金属細線の引張圧縮疲労下における線径の影響に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会関西支部平成30年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河野英
2. 発表標題 金属細線の曲げ疲労に及ぼす結晶粒径の影響
3. 学会等名 日本機械学会関西支部平成29年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大西朱花
2. 発表標題 TiNi超弾性合金の水素環境下における疲労寿命に及ぼす線径の影響に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会関西支部平成29年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石本雄太
2. 発表標題 繰返し曲げ応力を受ける工業用純鉄細線の破壊挙動
3. 学会等名 日本機械学会M&M2016材料力学カンファレンス
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 横川雄大
2. 発表標題 繰返し曲げ応力を受ける金属細線の破壊挙動
3. 学会等名 日本機械学会関西学生会平成28年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----